

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2023, Том 10, № 4 / 2023, Vol. 10, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/11SATS423.pdf>

DOI: 10.15862/11SATS423 (<https://doi.org/10.15862/11SATS423>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Анализ современных подходов к проектированию и строительству арочных мостов с использованием трубобетона

Астанков К.Ю.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Астанков Константин Юрьевич, e-mail: ast-most@yandex.ru

Аннотация. Данная статья является частью диссертационного исследования автора. В статье рассматривается опыт применения трубобетонных конструкций в мостостроении на примере объектов, построенных за последние 30 лет в Китайской Народной Республике. Рассмотрены особенности строительства моста через р. Сюнь в уезде Пиннань провинции Гуанси, с рекордным пролётом.

Автором выполнен обзор выдающихся объектов, построенных с применением большепролётных решётчатых арок из трубобетонных элементов, работающих преимущественно на внецентренное сжатие. Рассмотрены различные способы монтажа пролётов сталетрубобетонных арочных мостов, преимущества и недостатки каждого метода. Подробно проанализирована технология бетонирования труб, конструкции и методы строительства объектов с применением большепролётных арок сплошного сечения с затяжкой для строительства мостов средних и больших пролётов.

Выполнен обзор современных исследований в области работы изгибаемых арок, сделано сравнение с моделью, предполагающей работу трубобетонного элемента как внецентренно сжатой колонны, что в перспективе способно обеспечить более эффективное

использование свойств материалов при проектировании. Рассмотрены современные подходы к исследованию трубобетонных элементов.

Сделан вывод о большом объёме исследований работы трубобетона на внецентренное сжатие при недостаточности экспериментальных данных о работе арочных трубобетонных конструкций, работающих на изгиб.

Интерес представляет исследование возможности применения трубобетона для малых пролётов при строительстве мостов.

Автором установлена перспективность использования трубобетонных конструкций для устройства арок пролётных строений при строительстве малых грунтозасыпных мостов, что особенно важно в районах, удалённых от предприятий стройиндустрии с малоразвитой сетью автомобильных дорог. Выявлена необходимость проведения исследований изгибаемых трубобетонных конструкций для реализации этой цели.

Ключевые слова: трубобетон; изгибаемые; монтаж большепролётных арок; трубобетонные элементы; бетонирование трубобетонных арок

* Данная статья является частью диссертационного исследования автора

Analysis of modern approaches to the design and construction of arch bridges using tube-reinforced concrete

Konstantin Yu. Astankov

Ural State Transport University, Ekaterinburg, Russia

Corresponding author: Konstantin Yu. Astankov, e-mail: ast-most@yandex.ru

Abstract. This article is a part of the author's dissertation research. The paper discusses experience of application of tube-reinforced concrete structures in bridge construction on the example of facilities built over the last 30 years in the People's Republic of China. The peculiarities of the bridge construction over the Xun River in Pingnan County, Guangxi Province, with a record span are considered.

The author has made a review of outstanding facilities built with the use of long span braced arches made of tube-reinforced concrete elements working mainly in off-centre compression. Various tube-reinforced concrete arch bridge spans erection techniques, advantages and disadvantages of each method are considered. The technology of tube concrete coating, designs and construction methods of facilities with the use of long span solid cross-section arches with a tie for the bridge constructions of medium and large spans are analysed in detail.

The review of modern research works in the field of bending arches operation is carried out, in comparison with the model assuming the operation of the tube-reinforced concrete element as an off-centre compressed column is made, which in the future can

provide more effective use of material properties in design. Modern approaches to the tube-reinforced concrete elements study are considered.

It is concluded that there is a large amount of research on the work of tube-reinforced concrete in off-centre compression with insufficient experimental data on the work of arch tube-reinforced concrete structures working in bending.

It is of interest to study the possibility of tube-reinforced concrete application for small spans in the bridge construction.

The author has established the prospect of using tube-reinforced concrete structures for arch spans in the construction of small soil-backfilled bridges, which is especially important in areas remote from the construction industry with a poorly developed network of motorways. The necessity of carrying out the bending tube-reinforced concrete structures research works for realisation of this purpose is revealed.

Keywords: tube-reinforced concrete; installation of long span arches; bending tube-reinforced concrete elements; concrete casting of tube-reinforced arches

** This article is part of the author's dissertation research*

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons "Attribution" («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons "Attribution" 4.0 Global License



Введение

Introduction

Конструкции из трубобетона находят всё большее применение в строительстве — для большепролетных сооружений мостов, а также уникальных зданий большой высоты. Из сталетрубобетонных элементов (СТБ) образуются пространственные стержневые системы различной конфигурации. Трубобетон применяется и в мостостроении, где существуют перспектива для расширения его применения, благодаря уникальному сочетанию эффективности работы материалов, простоты конструкции, технологичности, а также высокой степени живучести элементов конструкции, даже после серьёзного повреждения элементов.

Впервые в практике отечественного мостостроения трубобетон был применён на строительстве Володарского моста в г. Ленинграде по проекту Г.П. Передерия при участии инженера В.И. Крыжановского.

Трубобетонный арочный мост решётчатой конструкции впервые был построен в 1939 году недалеко от г. Каменск-Уральский в Свердловской области и эксплуатируется до настоящего времени (рис. 1).



Рисунок 1. Арочный мост из трубобетона в г. Каменск-Уральский Свердловской области (источник: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kamensk_Bridge.jpg, автор фото — Денис Селиванов)

Figure 1. Arched bridge made of tube-reinforced concrete in Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk region (source: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kamensk_Bridge.jpg, author of the photo Denis Selivanov)

Большое развитие получило применение трубобетона в Китайской Народной Республике. Китайские инженеры, в результате выполнения необходимого комплекса исследовательских работ в области изучения конструкции и технологии строительства арочных мостов из трубобетонных элементов, достигли большого успеха в строительстве

таких мостов. В течение последних 30 лет в Китае было построено более 400 СТБ арочных мостов [1]. Кроме того, развитие мостостроения с применением трубобетона там и в настоящее время продолжается бурными темпами (рис. 2).

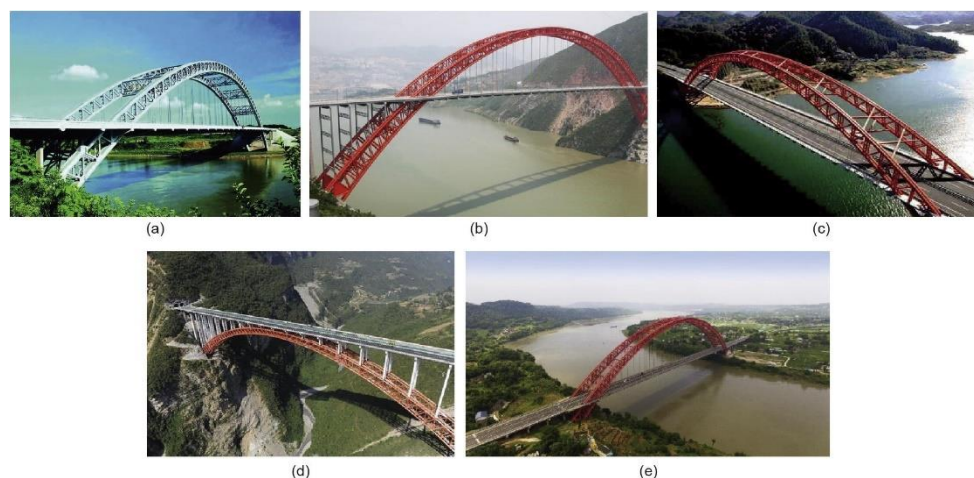


Рисунок 2. Мосты из трубобетона в Китае [1]: (а) мост через р. Юн в провинции Гуанси (главный пролёт 270 метров, строительство завершено в 1998 году); (б) мост через р. Янцзы в г. Ухань (пролёт 460 метров, построен в 2005 году); (с) мост через озеро Тайпин в провинции Аньхой (главный пролёт 352 м, построен в 2007 году); (д) мост через р. Чжицзин на автомагистрали Хуронси (главный пролёт 430 м, построен в 2009 году); (е) Первый мост через р. Янцзы в провинции Хэйцзян (главный пролёт 430 м, построен в 2009 году)

Figure 2. Bridges made of tube-reinforced concrete in China [1]: (a) bridge over the Yun River in Guangxi Province (main span 270 metres, construction completed in 1998); (b) bridge over the Yangtze River in Wuhan (460 metres span, completed in 2005); (c) Taiping Lake Bridge in Anhui Province (main span of 352 metres, completed in 2007); (d) Bridge over the Zhijing River on the Hurongxi Highway (main span 430 m, built in 2009); (e) First bridge over the Yangtze River in Heijiang Province (main span 430 metres, completed in 2009)

Эффективность трубобетона со стальной оболочкой получила подтверждение в связи с его широким использованием в строительстве не только мостов, но и высотных зданий, преимущественно, также в Китае. При этом, в большинстве случаев, трубобетонные элементы используются в качестве сжатых стержней в составе сложных пространственных конструкций [2]. Высокие прочностные характеристики и живучесть конструкций подтверждена В статье Пенгфэй Ли и его коллег: «Работа трубобетонных колонн при осевом сжатии» изложены результаты натурных экспериментов, выполненных командой учёных Чунцинского университета путей сообщения Среди прочих результатов, описывающих различное поведение элементов в зависимости от конструкции, типа и глубины заделки, данные проведённых экспериментов показали, что величина фактической несущей способности испытанных элементов намного выше значений, полученных теоретически, на основании

различных нормативов (NBR 8800, EC4, AISC, GB) [3]. Даже в исследовании, проведенном командой китайских учёных под руководством Джелиан Женга, изучавшего поведение под нагрузкой изгибаемой трубобетонной арки, работа бетона в трубе представляется, как материала, испытывающего одноосное сжатие [4]. Исследования коллектива Сюэсун Жанга посвящены развитию методов оптимизации структуры элементов пространственной арки большепролётного моста на примере моста Босиденг через р. Янцзы с длиной главного пролёта 500 м [5]. Целью исследования является определение параметров оптимальной кривой оси арки для уменьшения расчётных эксцентриситетов для снижения или полного исключения изгибающих моментов в трубобетонном элементе.

Передовые технологии, применяемые на строительстве СТБ мостов

Advanced technologies used in the construction of tube-reinforced concrete bridges

«Третий» мост в уезде Пиннань через р. Сюнь с рекордной для всего мира длиной пролёта в 575 метров построен в 2020 году провинции Гуанси [6] (рис. 3). Мост представляет собой арку решётчатой конструкции из сталетрубобетонных элементов с ездой посередине.

Строительство моста выполнено с использованием комплекса инновационных организационных и технологических решений, включая следующие:

- взаимная увязка процесса проектирования и заводского изготовления деталей с целью ускорения навесной сборки металлических конструкций фермы главной арки;
- использование технологической системы контроля усилий и перемещений вспомогательных монтажных мачт, а также системы оптимального распределения усилий при одновременном натяжении кабелей подвесок с использованием навигационной спутниковой системы BeiDou (BDS);
- применение технологии вакуумного бетонирования для повышения эффективности заполнения труб бетонной смесью в комплексе с использованием специальных безусадочных составов с увеличенным сроком начала схватывания — такой подход принципиально разрешает проблему присущего трубобетону недостатка, ограничивающего его применение в мостостроении, который заключается в возможном отслоении бетонного ядра от стенки трубы при усадке бетонной смеси;

- сооружение северной опоры моста на фундаменте нового типа, состоящем из сцементированного массива галечного грунта, заключённого в железобетонную обойму, выполненную по технологии «стена в грунте»;
- использование новейших подходов в организации строительства моста, заключающихся в объединении информационных технологий, результатов научных исследований и богатого опыта строительства подобных большепролётных объектов.



Рисунок 3. Мост через р. Сюнь в уезде Пиннань провинции Гуанси с рекордной, на сегодняшний день, длиной пролёта в 575 метров построен в 2020 году (источник: <https://www.globaltimes.cn/page/202012/1211292.shtml>, фото агентства Xinhua, автор фото Cao Yiming)

Figure 3. The bridge over the Xun River in Pingnan County, Guangxi Province, with a record-breaking span length 575 m built in 2020 (source: <https://www.globaltimes.cn/page/202012/1211292.shtml>, Xinhua News Agency, photo by Cao Yiming)

Длины пролётов мостов с решётчатой аркой из трубобетонных элементов на новых объектах постоянно продолжают увеличиваться, поскольку эта технология, является более перспективной даже по сравнению с обычным железобетоном, который используется для строительства уникальных мостов — примеров выдающихся достижений мостостроения мирового уровня. Так, на дату издания статьи Цзилиань Чжэн и Цзяньцзюнь Ван [1] (2018 г.), в мире насчитывалось всего четыре железобетонных арочных моста с пролётом более 400 метров. Все эти мосты построены в Китае, причём три из них запущены в эксплуатацию в 2016 году (рис. 4).

Первый в Китае арочный мост из СТБ элементов был построен в 1990 году через р. Дон (Dong) в уезде Ванцан провинции Сычуань [1]. С

того времени, около 18 мостов аналогичной конструкции возводится в КНР ежегодно. Таким образом, по данным на 2016 год, в Китае было построено более 400 арочных СТБ мостов, из них 54 имеют пролёт более 200 метров, 11 — пролёт более 300 метров и четыре моста имеют главный пролёт более 400 метров и ещё три таких моста находились в процессе строительства на дату выхода статьи [1].

Обзор методов монтажа пролётных строений большепролётных СТБ мостов

Superstructure erecting techniques overview of long span tube-reinforced concrete bridges

Интерес представляют не только общие технические параметры рассмотренных объектов, но и технологические приёмы, применяемые китайскими коллегами для строительства этих мостов, их рассматривают Цзилиань Чжэн и Цзяньцзюнь Ван в статье [1].

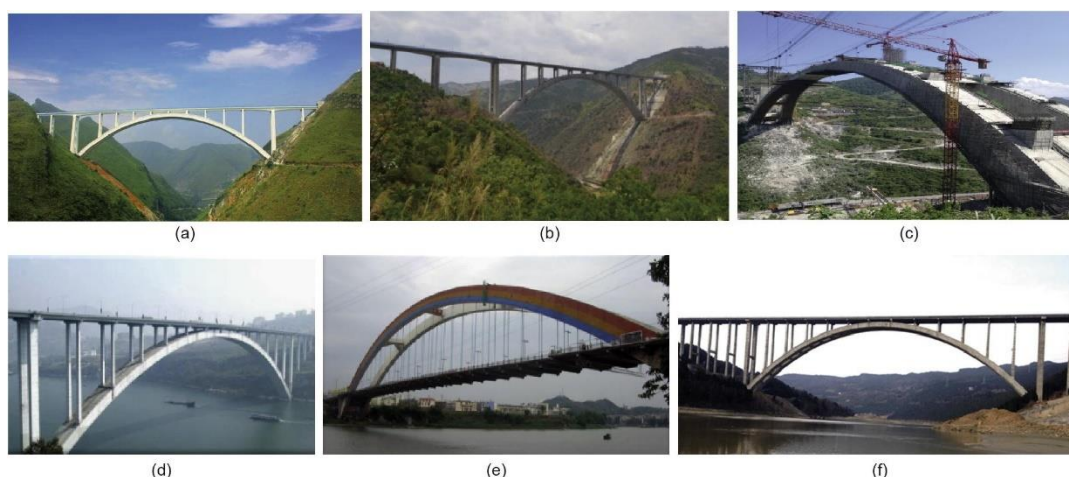


Рисунок 4. Мосты из железобетона в Китае [1]: (а) мост через р. Бейпан на перегоне высокоскоростной железной дороги Шанхай — Куньмин (главный пролёт 445 м, построен в 2016 г.); (б) железнодорожный мост через р. Нанпан на перегоне Юньнань — Гуанси (главный пролёт 416 м, построен в 2016 г.); (с) мост через р. Йеланг на перегоне высокоскоростной железной дороги Чунцин — Гуйчжоу (главный пролёт 370 м, построен в 2016 г.); (д) мост через р. Янцзы в городе Вэньчжоу (главный пролёт 420 м, построен в 1997 г.); (е) мост через р. Юн в г. Юннин, провинция Гуанси (главный пролёт 312 м, построен в 1996 г.); (ф) мост через р. Цзялин в районе Чжаохуа (главный пролёт 364 м, построен в 2012 г.)

Figure 4. Reinforced concrete bridges in China [1]: (a) bridge over the Beipan River at the Shanghai-Kunming high-speed railway crossing (main span 445 m, built in 2016); (b) railway bridge over the Nanpan River on the Yunnan-Guangxi High-Speed Railway (main span 416 m, built in 2016); (c) a bridge over the Yelang River on the Chongqing-Guizhou High-Speed Railway (main span 370 m, built in 2016); (d) Yangtze River Bridge in Wenzhou (main span 420 m, built in 1997); (e) Yong River Bridge in Yongning, Guangxi Province (main span 312 m, built in 1996); (f) Jialing River Bridge in Zhaohua District (364 m main span, built in 2012)

Наиболее важным и ответственным этапом при строительстве таких мостов является возведение решётчатой арочной конструкции из стальных труб. Для этого применяются, в основном, три метода: навесная сборка с использованием вспомогательных вантовых систем, поворот конструкции и подъём предварительно укрупнённых блоков.

Навесная сборка. В 1968 году китайские инженеры [1] разработали технологию, использующую метод навесной сборки с замыканием последней секции посредством ослабления вспомогательных стальных вант, удерживающих возводимую арку в процессе сборки. Этот метод впервые позволил отказаться от строительства временных опор в пределах возводимого пролёта и обеспечил безопасность и технологичность навесной сборки пролётного строения арки пролётом около 100 метров, разделённой на пять монтажных элементов (марок). Этот же метод, с учётом развития технологии, используется и в настоящее время, он был применён на строительстве «Третьего» моста в уезде Пиннань через р. Сюнь, запущенном в эксплуатацию в 2020 году.

Суть рассматриваемого способа заключается в следующем. Арка возводится с двух сторон навесным методом. Для удержания половинок арки устраивается система временных пилонов и вант, закреплённых одним концом на берегу, а другим на арке. Система временных пилонов и вант, кроме её основного назначения, служит также ещё и опорой для кабельных кранов, осуществляющих подъём монтажных марок. Такой подход сделал возможным возведение арочных мостов без необходимости сооружения временных устройств, поддерживающих в процессе монтажа арку снизу, для которых, в свою очередь, требуются опоры в пределах пересекаемого препятствия, что само по себе зачастую является довольно сложной задачей, решаемой за счёт серьёзных затрат времени, труда и материалов, не говоря уже о влиянии на окружающую среду.

Благодаря простоте системы подвесов и высокой экономической эффективности, стоимость строительства моста с решётчатой аркой из СТБ элементов с пролётом 100 метров эквивалентна стоимости обычного железобетонного балочного моста с пролётом 30 метров [1]. Такой метод использовался для строительства и других арочных мостов, количество которых превышает 1 000. Ярким примером применения этой технологии является мост Цзюцзичжоу через реку Сян в городском округе Чанша, который был построен в 1972 году, имеет общую длину 1 250 метров и пролёты по 76 метров.

В 1994 году была разработана технология замыкания пролёта с использованием навесной консольной сборки на временных вантах с установкой замкового блока и последующим ослаблением поддерживающих вант. Этот способ впервые был применён для сборки каркаса из стальных

труб при строительстве арки с главным пролётом 312 метров. Для подачи и возврата в первоначальное положение стальных канатов использовался подъёмный домкрат, что позволило достичь точности в 1 мм. монтаж арки производится последовательно из готовых сегментов. Статическую геометрическую неизменяемость арки при монтаже таким способом можно достичь при наличии только трёх блоков, независимо от количества используемых сегментов, что делает этот метод применимым для монтажа мостов с пролётом более 100 метров. Данный способ применялся при строительстве сотен арочных мостов, включая такие знаменитые объекты, как мост через р. Лупу в Шанхае с главным пролётом 550 м, Первый мост через р. Янцзы в провинции Хэйцзян с пролётом 530 м, мост через р. Янцзы в городе Вэньчжоу с пролётом 420 м и мост через р. Бейпан на автостраде Шанхай — Куньмин с пролётом 445 метров. Эта технология использовалась также и при строительстве моста Фусин в г. Ханчжоу (рис. 5) [1], при этом была достигнута высочайшая производительность монтажа — перекрытие одного пролёта выполнялось в течение двух дней, строительство же всего этого двухъярусного моста общей длиной 1 376 метров и площадью 70 000 квадратных метров было завершено в течение двух лет.



Рисунок 5. Монтаж моста Фусин в г. Ханчжоу с использованием системы временных вант [1]

Figure 5. Installation of the Fuxing Bridge in Hangzhou using a temporary cable station [1]

Монтаж способом поворота. Этот способ монтажа для строительства арочных мостов был освоен китайскими инженерами в 1977 году, при этом выполняется поворот пролётного строения в горизонтальной или в вертикальных плоскости [1]. До настоящего

времени он применялся на строительстве более, чем 70 мостов. Типовым примером горизонтального поворота пролёта является железнодорожный мост через р. Бейпан на перегоне Гуйчжоу — Шуйбай (рис. 6). Мост выполнен из трубобетонной арки с ездой поверху, пролёт составляет 236 метров, высота над уровнем реки — 275 метров, построен в 2001 году. Этот способ имеет преимущество в том, что он обеспечивает возведение объекта, совершенно независимо от состояния подмостового пространства, не изменяет статическую схему сооружения в процессе поворота и обеспечивает высокий уровень безопасности производства работ. Однако, существенным недостатком этого способа является высокий уровень затрат на сооружение временного поворотного стола, что препятствует его широкому применению, особенно для строительства мостов с большими пролётами.



*Рисунок 6. Железнодорожный мост через р. Бейпан
на железнодорожном перегоне Гуйчжоу — Шуйбай (источник:*

https://ru.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Beipanjang_Railway_Bridge-4.jpg, автор фото — Glabb)

Figure 6. Railway bridge over the

Beipan River at the Guizhou — Shuibai railway crossing (source:

https://ru.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Beipanjang_Railway_Bridge-4.jpg, photo by Glabb)

Монтаж крупными блоками. Такой способ монтажа подразумевает использование плавучих средств и домкратов высокой грузоподъёмности, он использовался на строительстве двух крупных

объектов [1], что в масштабе рассматриваемого числа объектов незначительно. Этот метод удобен тем, что минимизирует количество операций, выполняемых на высоте. Перераспределение напряжений в элементах фермы отдельного сегмента арки компенсируется установкой временных распорок или затяжек, это позволяет максимально увеличить длину подаваемого на монтаж сегмента. Увеличение массы поднимаемого сегмента решается увеличением количества подъёмных домкратов. Цзилиань Чжэн и Цзяньцзюнь Ван [1] считают этот метод очень перспективным, по их мнению, он позволит ещё больше увеличить пролёт возводимых СТБ мостов.

Технология бетонирования СТБ конструкций моста для обеспечения совместной работы бетона и стальной трубы. Несущая способность СТБ элементов арок моста зависит от взаимодействия между стальной трубой и заключённого в ней бетонного ядра. Множество исследований, в том числе и экспериментальных, было посвящено изучению природы касательной сила сцепления на границе материалов внутри СТБ элемента. При этом было установлено [1], что она состоит из четырёх компонентов: химические силы межмолекулярного взаимодействия, механические силы трения покоя и трения скольжения, причём силу трения покоя, в свою очередь, Цзилиань Чжэн и Цзяньцзюнь Ван разделяют на две составляющих: для малых перемещений — «механическую» (*mechanical bite force*) и для больших перемещений — «макроскопическую» (*macroscopic bite force*). Так, самыми слабыми из рассматриваемых сил являются силы химического взаимодействия — они исчезают уже при начальных стадиях сдвига, возникающих при действии малейших растягивающих напряжений. Силы трения скольжения и трения покоя (макроскопическая) проявляются только при больших значениях относительного проскальзывания компонентов СТБ элемента. Механические силы трения покоя проявляются, начиная с малых перемещений и действуют до начала работы сил трения скольжения. Отслоение бетона от стальной трубы внутри СТБ элемента оказывает существенное влияние на силу сцепления и местную устойчивость стенки стальной трубы. Для предупреждения этого дефекта необходимо решение двух следующих задач: первая — гарантировать отсутствие воздушных полостей при бетонировании трубы, и вторая — обеспечить баланс параметров расширения и усадки бетонной смеси не только при наборе прочности, но и на протяжении всего жизненного цикла сооружения.

При приготовлении бетонной смеси необходимо соблюдение двух существенных условий. Первое — обеспечение требуемой подвижности и устойчивости смеси против её расслоения для обеспечения укладки без необходимости уплотнения. Второе — придание при этом безупречных бетону свойств на протяжении всего периода эксплуатации. Необходимая

подвижность и устойчивость бетонной смеси достигается контролем толщины водной плёнки, а также сцепления и трения на межфазных поверхностях её компонентов. Усадка бетона исключается применением добавок, компенсирующих деформацию усадки и изменение внутренней структуры цементного камня на химическом уровне, а также применений специальной технологии ухода за бетоном. При этом, в готовом элементе возникают небольшие сжимающие напряжения, поэтому на стадии проектирования должно быть предусмотрено наличие этих начальных напряжений.

Процесс укладки бетонной смеси в своём развитии прошёл несколько стадий: заливка нижележащих отсеков с подачей смеси сверху, закачивание смеси снизу-вверх и метод вакуумирования, который является наиболее современным и гарантирует качество укладки смеси в трубу. Этот метод был экспериментально проверен на натурных моделях СТБ элементов в процессе подготовки к строительству Первого моста через р. Янцзы в провинции Хэйцзян. Испытания подтвердили, что заполнение труб методом вакуумирования с отрицательным давлением величиной от 0,07 до 0,09 МПа в сочетании с подачей раствора под давлением снизу позволяет достичь лучших результатов, по сравнению с традиционным способом. Длина каждого трубчатого пояса фермы арки приблизительно 600 метров, для её заполнения требуется около 800 м³ бетона класса С60. Бетонная смесь на весь отсек (представляющий одну захватку) подаётся непрерывно, с выделением трёх ярусов, что позволяет сократить время, в течение которого необходимо обеспечивать задержку начала схватывания смеси, а также уменьшить рабочее давление применяемых бетонных насосов (рис. 7). Количество уровней зависит от объёма захватки и доступных на площадке производственных мощностей. Постоянно изменяющиеся по мере заполнения бетонной смесью отклонения свода арки компенсируются натяжением системы временных вант. Для заполнения одного трубчатого пояса арки обычно требовалось 12 часов и процесс бетонирования всех восьми поясов главной арки занял 33 дня. В течение трёх дней была выполнена ультразвуковая дефектоскопия сплошности бетона во всех 144 фланцевых стыках. Исследование показало, что 100 % проверенных стыков соответствуют требованиям норм и них 92 % — безупречного качества, что подтверждает надёжность принятой технологии.

Разработка технологии вакуумного бетонирования позволяет преодолеть некоторые сложности, препятствующие применению СТБ в мостостроении. С применением этой технологии в 2013 году был построен Первый мост через р. Янцзы в провинции Хэйцзян с рекордным среди сталетрубобетонных арок пролётом 530 метров. Общая стоимость строительства составила 260 млн юаней, что на дату написания настоящей

статьи составляет около 2,8 млрд рублей. Это существенно ниже стоимости традиционных мостов с аналогичными параметрами. Например, стоимость строительства Второго моста через р. Янцзы в провинции Хэйцзян с главным пролётом 420 метров оказалась на 100 млн юаней выше при той же продолжительности строительства.

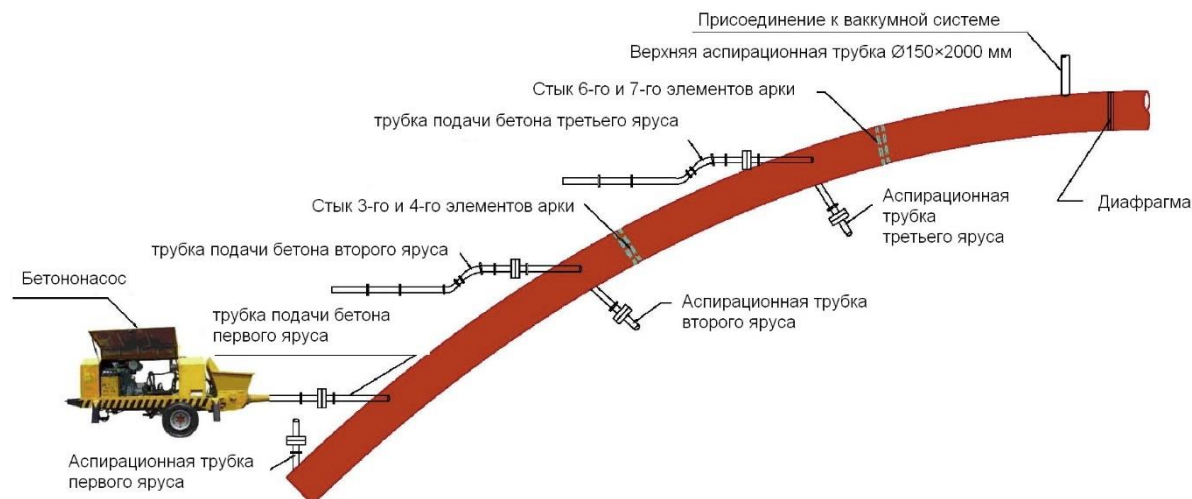


Рисунок 7. Схема непрерывного вакуумного бетонирования захватки с разделением её на три яруса [1]

Figure 7. Continuous vacuum concrete casting diagram of the pour with its division into three tiers [1]

Обзор конструкций и методов строительства СТБ арок с затяжкой

Review of construction designs and methods of tube-reinforced concrete arches with a tie

С учётом рассмотренных примеров строительства мостов из СТБ арок больших пролётов, учитывая эффективность материала, доступность и сравнительную простоту технологий, а также привлекательную стоимость строительства, представляет интерес вопрос возможности использования имеющихся достижений для строительства мостов меньших пролётов, а особенно малых мостов.

Мост с относительно небольшим пролётом, но при этом обладающий сравнительно простой конструкцией рассмотрен в статье Бао-чан Чен и др. о применении СТБ для строительства арочных мостов с обзором результатов экспериментов по определению предельной нагрузки для арок не только решётчатой конструкции арочного трубобетонного моста Куньи в городе Фуан провинции Фуцзянь.

Мост представляет собой арку с ездой посередине. Главный пролёт арки составляет 46 метров, стрела подъёма принята 1/3, что составляет 15,3 метра. Фасад моста показан на рисунке 8. Пояс арки выполнен из

одиной стальной трубы диаметром 800 мм с толщиной стенки 14 мм, заполненной бетоном класса С30. Параллельные пояса арки связаны двумя горизонтальными поперечными связями из одиночных стальных труб, установленными в области свода, а также двумя железобетонными поперечными балками с раскосами из стальных труб — в основании арки.

Габарит автомобильного проезда по ширине составляет 12 метров, с двух сторон от него размещены тротуары шириной 1,5 метра каждый. Проезжая часть моста выполнена из железобетонных плит пролётом 4 метра и толщиной 200 мм, опирающихся на систему продольных и поперечных балок. Продольные балки соединяются с верхней частью арки подвесками из труб $\varnothing 109 \times 5$ мм, выполненными из высокопрочной стали. Надарочные стойки выполнены из железобетона. Мост был запущен в эксплуатацию в июле 1998 года, строительство начато в 1996 году.

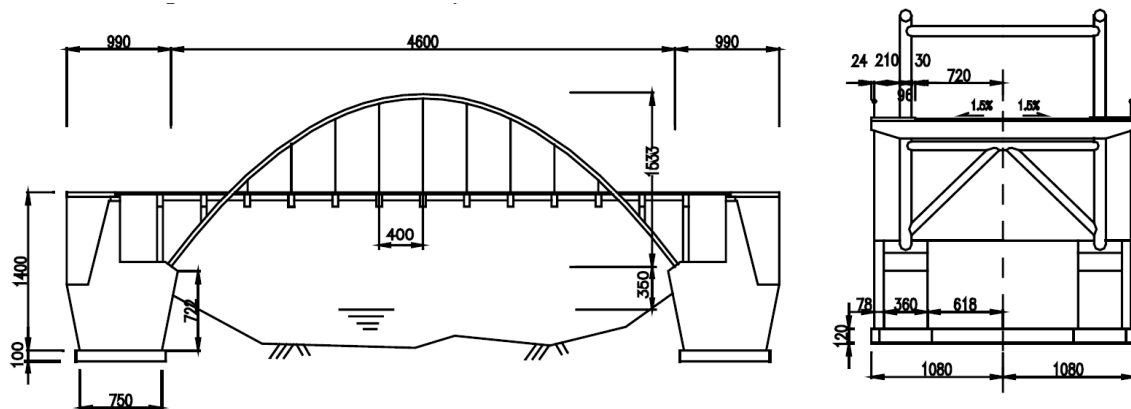


Рисунок 8. Чертёж моста Куньи в городе Фуан провинции Фуцзянь, размеры указаны в сантиметрах [6]

Figure 8. Drawing of the Kunyi Bridge in the city of Fuang, Fujian Province, dimensions are given in centimetres [6]

Для строительства арочных мостов на равнинных территориях обычно применяются арки с ездой понизу, при этом продольная балка проезжей части моста зачастую используется в качестве затяжки, что существенно повышает эффективность конструкции и позволяет исключить действие распора на устои моста. Конструкция и объём фундаментов моста сильно упрощается, что положительным образом сказывается на их стоимости и стоимости сооружения в целом. Кроме того, в этом случае возможно размещение моста в грунтах, к которым не предъявляются высокие требования по прочности и деформативности, т. к. арочные мосты без затяжки строятся преимущественно на скальном основании, множество примеров таких мостов было рассмотрено в начале настоящей статьи.

Сложность в строительстве арочных мостов с затяжкой в уровне проезжей части связана с тем, что при возведении моста до замыкания всей конструкции (системы затяжек и подвесов) горизонтальный распор

воспринимается только фундаментами. Поэтому длина пролёта при строительстве мостов такой конструкции обычно ограничивается величиной 100 метров.

Один из таких мостов — Второй мост через реку Хуанхэ в городе Чжэнчжоу [7] (рис. 9). Мост состоит из двух параллельных независимых частей и обеспечивает пропуск автотранспорта по четыре полосы в каждом направлении — по четыре на каждой из частей.



Рисунок 9. Строительство Второго моста через реку Хуанхэ в Чжэнчжоу [8]

Figure 9. Construction of the Second Bridge over the Huanghe River in Zhengzhou [8]

Русловая часть моста перекрыта восемью одинаковыми 100-метровыми пролётами (по осям опор), пролёт каждой арки составляет 95,5 метра. Стрела подъёма арок составляет $1/4,5$; ось арки описывается кантернарной кривой с параметром $a = -1,347$. Расстояние по осям арок вдоль моста составляет 22,377 метра, жёсткость конструкции в поперечном направлении обеспечивается установкой в каждой арке трёх поперечных связей из полых стальных труб: одной прямой и двух с К-образными подкосами Чжэнчжоу (рис. 10).



Рисунок 10. Конструкция Второго моста через реку Хуанхэ в Чжэнчжоу. Размеры на фасаде указаны в см, на сечении — в мм [8]

Figure 10. Design of the Second Bridge over the Huanghe River in Zhengzhou. The dimensions on the facade are in cm, on the cross-section — in mm [8]

Профиль каждой арки представляет собой составное (гантелеобразное) сечение из двух СТБ элементов с жёсткими вставками из стальных двутавров. Такая конструкция арок обеспечивает более высокую жёсткость сечения на изгиб по сравнению с одиночной трубой и при этом она проще в изготовлении и придаёт более лаконичный внешний вид сооружения по сравнению с решётчатой конструкцией фермы. Обычно такое решение применяется для перекрытия пролётов от 60 до 120 метров.

Центры труб в сечении пояса рассматриваемого моста разнесены на расстояние 1 400 мм по высоте, вертикальный габарит сечения составляет 2 400 мм, обе трубы заполнены бетоном C50. Обычно, диаметры D применяемых труб находятся в интервале от 150 до 1 500 мм, в большинстве случаев — это 750–900 мм, просвет между трубами L назначается из определения соотношения D/L в пределах от $1/60$ до $1/150$. Общая высота сечения пояса H , таким образом, составляет от 1 200 до 2 000 мм, соотношение H/L — от $1/30$ до $1/60$ и D/L — от $1/2,11$ до $1/2,67$ (обычно, $1/2,5$). Толщина стенки стальной трубы — от 8 до 16 мм, в основном — 10 мм. В общем случае, соотношения D/L и H/L уменьшаются с увеличением пролёта арки. Подвески выполнены из высокопрочных стальных канатов, защищённых двухслойным покрытием из полиэтилена. Продольная балка проезжей части, используемая в качестве затяжки, выполнена в виде предварительно напряжённой железобетонной балки коробчатого сечения с размерами 2 м шириной и 2,75 м высотой. Каждое пролётное строение опирается на четыре резиновые опорные части грузоподъёмностью по 1 750 тонн [7]. Строительство моста завершено в 2004 году.

Несмотря на признанную эффективность работы трубобетонных элементов на сжатие, работа трубобетона на изгиб исследована гораздо меньше. Однако, имеющиеся в этой области работы свидетельствуют о перспективности этого направления и необходимости проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований [9].

Современные исследования работы арки на изгиб в сравнении с внецентренно сжатой стойкой

Current research on the flexural performance of an arch at bends in comparison with an off-centre compressed column

О результатах исследований, выполняющихся в направлении исследования работы изгибаемой трубобетонной арки в 2023 году опубликована работа Шаоруи Вэнга [10]. В статье рассматривается фактическая, наиболее приближенная к реальной, механика работы арочного изгибаемого СТБ элемента по схеме изгибаемой арки в отличие

от общепринятой в нормах схемы работы элемента арки как внецентренно сжатого стержня.

Для возможности анализа фактического напряжённо-деформированного состояния, моделей разрушения элементов, а также изгибающего момента с учётом его геометрической нелинейности, была проведена серия натурных испытаний СТБ арок и выполнено сопоставление их результатов с данными, полученными в результате расчётов по традиционной модели внецентренно сжатого элемента.

Результаты экспериментов [10] показали, что распределение воздействия внешних сил, вызывающих изгиб арки, производит в ней внутренние усилия в виде изгибающего момента, поперечной и продольной сил, вызывающих, в свою очередь, в опоре вертикальную реакцию и отпор. При этом, во внецентренно сжатой колонне возникает только вертикальная реакция в основании и изгиб, вызываемый эксцентриситетом прикладываемой продольной силы (рис. 11).

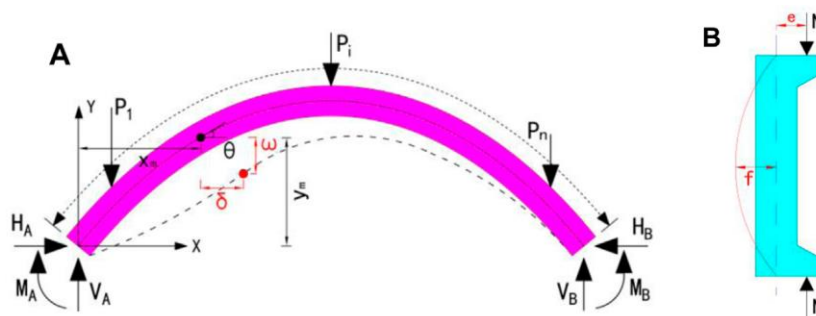


Рисунок 11. Усилия в элементе в зависимости от принятой модели расчёта: А — при расчёте по схеме изгибаемой арки; В — по схеме внецентренно сжатого стержня [10]

Figure 11. Element tractions depending on the adopted calculation model: А — for the bending arch scheme; В — for the off-centre compressed bar scheme [10]

Стадии деформирования изгибаемой арки, в основном, совпадают со схемой внецентренно сжатой колонны. Однако, модели разрушения в рассмотренных схемах существенно различаются. Так, изгибаемая арка разрушается с образованием пластических шарниров в четырёх точках, а внецентренно сжатая колонна — с образованием шарнира в одной точке. При расчёте элемента по модели внецентренно сжатой колонны деформационная способность изгибаемой арки выше искусственно занижается.

Теоретические значения изгибающего момента, определяемого с учётом геометрической нелинейности, в обоих случаях совпадают. Способ определения значений этого момента в расчётном сечении с использованием эксцентриситета является надёжным, но даёт несколько заниженные результаты, при этом, недостаточно изучено влияние

геометрической нелинейности на величину момента в других сечениях. Таким образом, основные различия рассматриваемых моделей заключаются в схемах распределения и путях передачи усилий, а также причинах возникновения деформаций.

Заключение

Conclusion

Сфера применения трубобетонных элементов, испытывающих поперечный изгиб, представляется очень обширной и может охватывать почти все случаи применения балок небольших пролётов. Известно, что для строительства малых мостов с пролётами до 40 метров эффективно применение арочной засыпной конструкции. Такой подход позволяет вдвое сократить стоимость строительства и на 30–40 % снизить затраты на материалы [11]. Рассмотренные выше примеры применения трубобетонных конструкций с учётом их способности эффективно работать не только на внецентренное сжатие, но и на изгиб, позволяют рассматривать их в качестве основных несущих конструкций арок при строительстве малых грунтозасыпных мостов. К настоящему времени разработан ряд оригинальных технических решений для повышения эффективности изгибаемых трубобетонных элементов [12–15] однако, в основном, балочных. Коллективом отечественных исследователей под руководством И.Г. Овчинникова проведена значительная работа по систематизации методов расчёта трубобетона с металлической и композитной оболочкой, с дополнительным армированием и без него, с различной формой поперечного сечения элементов, в том числе и с отверстиями для уменьшения расхода бетона и снижения веса конструкции [2; 16–19].

Результаты исследования трубобетонных конструкций, работающих на изгиб изложены в работах Л.И. Стороженко. В его работах рассмотрена работа и описана методика расчёта элементов конструкций промышленных и гражданских зданий: балки, сжатые элементы ферм и сквозных колонн [20]. Информация о современных натурных экспериментальных исследованиях изгибаемых трубобетонных конструкций содержится только в статьях учёных из КНР: Ш. Вэнга [10], З. Чена изучающего работу и сталетрубобетонных свай не только в упругой, но и в пластической стадии [21] и др.

В связи с изложенным выше, большой интерес представляет исследование возможности применения трубобетона для устройства арок малых пролётов при строительстве грунтозасыпных мостов [22]. Наиболее близкими к этой теме являются работы Д. Женга [4] и Ш. Ванга [10], исследующих работу криволинейного арочного трубобетонного элемента на изгиб. Отдельные результаты этих работ могут быть применены для

моделирования работы грунтозасыпного моста с несущими трубобетонными арками.

Высокая степень надёжности конструкций из трубобетона и их способность длительное время выдерживать нагрузку после начала разрушения (на стадии пластической работы трубобетонного элемента — при разрушении сжатого бетонного ядра) хорошо влияет на повышение общей живучести сооружения, что является обязательным требованием СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» — обеспечение прочности и устойчивости формы и положения остальных элементов при выходе из строя отдельных конструктивных элементов.

Кроме того, использование трубобетонных конструкций для строительства малых засыпных арочных мостов является особенно перспективным в районах, удалённых от предприятий стройиндустрии, с малоразвитой сетью автомобильных дорог, что очень важно для быстрого строительства или восстановления сообщений, из-за отсутствия необходимости транспортировки крупногабаритных и массивных строительных мостовых конструкций и необходимой для их монтажа тяжёлой техники.

Развитие теоретических методов расчёта изгибаемых арок, основанных на результатах экспериментов и опытно-конструкторских работ, является перспективным направлением исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zheng, J.** Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridges in China / J. Zheng, J. Wang. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.12.003> // Engineering. — 2018. — Т 4. — № 1. — С. 143–155. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917303491>. (дата обращения: 28.09.2023).
2. **Овчинников, И.И.** О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 1. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Г.В. Чесноков, Е.С. Михалдыкин. — DOI <https://doi.org/10.15862/95TVN415> // Интернет-журнал Наукоедение. — 2015. — Т 7. — № 4. — С. 95TVN415. — URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/95TVN415.pdf>. — EDN UMATZN. (дата обращения: 28.09.2023).
3. **Li, P.** Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Columns Subjected to Axial Compression / P. Li, T. Zhang, C. Wang. — DOI <https://doi.org/10.1155/2018/4059675> // Advances in Materials Science and Engineering. — 2018. — Т 2018. — С. 4059675. — URL: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2018/4059675/>. (дата обращения: 28.09.2023).
4. **Zhang, X.-N.** Experimental and numerical application on bending resistance of concrete filled tube arch at fixed ends / X.-N. Zhang, R.-L. Shan, C.-Z. Qi // Romanian Journal of Materials. — 2018. — Т 48. — № 2. — С. 251–259. — URL: <https://www.revista-romana-de-materiale.upb.ro/administrare/content/doc/2018/2/16/server/files/articol.pdf>. (дата обращения: 28.09.2023).
5. **Zhang, X.** Optimization Method for Solving the Reasonable Arch Axis of Long-Span CFST Arch Bridges / X. Zhang, N. Liang, X. Lu, A. Gu, J. Shan. — DOI <https://doi.org/10.1155/2019/7235656> // Advances in Civil Engineering. — 2019. — Т 2019. — С. 7235656. — URL: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/7235656/>. (дата обращения: 28.09.2023).

6. **Zheng, J.** Innovations in Design, Construction, and Management of Pingnan Third Bridge—The Largest-Span Arch Bridge in the World / J. Zheng, H. Du, T. Mu, J. Liu, D. Qin, G. Mei [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1080/10168664.2021.1956399> // Structural Engineering International. — 2021. — Т 32. — № 2. — С. 134–141. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10168664.2021.1956399>. (дата обращения: 28.09.2023).
7. **Chen, B.-C.** Application of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridges and Study on Ultimate Load-Carrying Capacity / B.-C. Chen, Y.-J. Chen, Z.-B. Qin, H. Hikosaka // Arch Bridges ARCH'04 / Под ред.: P. Roca, E. Oñate. — Барселона: CIMNE, 2004. — URL: <https://caminstech.upc.edu/sites/default/files/Application%20of%20Concrete%20Filled%20Steel%20Tubular%20Arch%20Bridges%20and%20Study%20on%20Ultimate.%20Load-Carrying%20Capacity.pdf>. (дата обращения: 28.09.2023).
8. **Zhang, W.-Z.** Design of The Second Highway Bridge over Yellow River in Zhengzhou, China / W.-Z. Zhang, B.-C. Chen, W.-J. Huang // Arch Bridges ARCH'04 / Под ред.: P. Roca, E. Oñate. — Барселона: CIMNE, 2004. — URL: <https://caminstech.upc.edu/sites/default/files/Design%20of%20the%20Second%20Highway%20Bridge%20over%20Yellow%20River%20in%20Zhengzhou,%20China.pdf>. (дата обращения: 28.09.2023).
9. **Астанков, К.Ю.** Перспективы применения трубобетонных конструкций для строительства малых арочных мостов / К.Ю. Астанков, И.Г. Овчинников // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства: Сборник научных статей, Гродно, 13–14 мая 2021 года / Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2021. — С. 110–112. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46577655>. — EDN CDRRLH. (дата обращения: 28.09.2023).
10. **Wang, S.** Calculation model of concrete-filled steel tube arch bridges based on the “arch effect” / S. Wang, Y. Li, Z. Liu, T. Cheng. — DOI <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1084999> // Frontiers in Materials. — 2023. — Т 9. — С. 1084999. — URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2022.1084999/full>. (дата обращения: 28.09.2023).
11. **Дробышевский, Б.А.** Малые мосты: монография / Б.А. Дробышевский. — Москва: ИНФРА-М, 2020. — 228 с.
12. **Моисеев, О.Ю.** Трубобетонные балки с частично предварительно напряженным бетонным ядром для пролетных строений малых мостов / О.Ю. Моисеев, Д.Н. Парышев, И.Г. Овчинников [и др.] // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. — 2016. — Т 1. — С. 283–288. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27202374>. — EDN WVGZZN. (дата обращения: 11.10.2023).
13. **Овчинников, И.Г.** Повышение эффективности трубобетонных балок для пролетных строений мостов применением предварительного напряжения / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, О.Ю. Моисеев [и др.] // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства: Международная научно-практическая конференция, Красноярск, 07–08 апреля 2016 года. Том Часть 1 / Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. — С. 147–150. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26667546>. — EDN WLOSIL. (дата обращения: 11.10.2023).
14. **Моисеев, О.Ю.** Инновационная трубобетонная балка для пролетных строений балочных малых мостов / О.Ю. Моисеев, Д.Н. Парышев, И.Г. Овчинников [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.20291/2311-164X-2016-2-67-71> // Инновационный транспорт. — 2016. — № 2. — С. 67–71. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26557040>. — EDN WJDVQD. (дата обращения: 11.10.2023).
15. **Овчинников, И.Г.** Повышение нагрузочной способности трубобетонной балки / И.Г. Овчинников, Д.Н. Парышев, А.В. Ильяков [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15593/24111678/2019.04.07> // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. — 2019. — № 4. — С. 58–66. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42210684>. — EDN CCCSVL. (дата обращения: 11.10.2023).
16. **Овчинников, И.И.** О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 2. Расчет трубобетонных конструкций с металлической оболочкой / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Г.В. Чесноков, Е.С. Михалдыкин. — DOI <https://doi.org/10.15862/112TVN415> // Интернет-журнал Науковедение. — 2015. — Т 7. — № 4. — С. 112TVN415. — URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/112TVN415.pdf>. — EDN UMATZX. (дата обращения: 11.10.2023).

17. **Овчинников, И.И.** О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 3. Опыт применения полимерных композитных материалов в мостостроении / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Г.В. Чесноков, Е.С. Михалдыкин. — DOI <https://doi.org/10.15862/27TVN515> // Интернет-журнал Науковедение. — 2015. — Т 7. — № 5. — С. 27TVN515. — URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/27TVN515.pdf>. — EDN VJKRBL. (дата обращения: 11.10.2023).
18. **Овчинников, И.И.** О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 4. Опыт применения трубобетонных свай с оболочкой из полимерных композиционных материалов / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Г.В. Чесноков, Е.С. Михалдыкин. — DOI <https://doi.org/10.15862/148TVN615> // Интернет-журнал Науковедение. — 2015. — Т 7. — № 6. — С. 148TVN615. — URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/148TVN615.pdf>. — EDN VOBHJH. (дата обращения: 11.10.2023).
19. **Овчинников, И.И.** О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 5. Опыт применения трубобетонных арок и гибридных конструкций с оболочкой из полимерных композиционных материалов / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Г.В. Чесноков, Е.С. Михалдыкин. — DOI <https://doi.org/10.15862/02TVN116> // Интернет-журнал Науковедение. — 2016. — Т 8. — № 1. — С. 02TVN116. — URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/02TVN116.pdf>. — EDN VVNRVV. (дата обращения: 11.10.2023).
20. **Chen, Z.** Numerical Analysis on the Bending Capacity of the Concrete-Filled Micro-Steel-Tube Piles / Z. Chen, S. Pu, H. Wang. — DOI <https://doi.org/10.1155/2022/2317594> // Mathematical Problems in Engineering. — 2022. — Т 2022. — С. 2317594. — URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2022/2317594/>. (дата обращения: 11.10.2023).
21. **Стороженко, Л.И.** Изгибаемые трубобетонные конструкции / Л.И. Стороженко, В.И. Ефименко, П.И. Плахотный. — Киев: Будивельник, 1994. — 104 с.
22. **Астанков, К.Ю.** Анализ возможности применения российских норм проектирования сталетрубобетонных конструкций в малом мостостроении / К.Ю. Астанков, А.С. Пермикин, И.Г. Овчинников. — DOI <https://doi.org/10.15593/24111678/2022.02.07> // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. — 2022. — № 2. — С. 53–63. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49235114>. — EDN ARDMRJ. (дата обращения: 11.10.2023).

Сведения об авторах:

Астанков Константин Юрьевич — доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Екатеринбург, Россия, e-mail: ast-most@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2592-5569>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=981058

Статья получена: 08.12.2023. Принята к публикации: 10.03.2024. Опубликовано онлайн: 24.03.2024.

REFERENCES

1. Zheng J., Wang J. Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridges in China. *Engineering*. 2018; 4(1): 143–155. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.12.003>.
2. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikxaldykin E.S. About the problem of the analysis of tube-confined concrete structures with a shell made of different materials. Part 1. The application of tube-confined concrete with metal shell. *Naukovedenie*. 2015; 7(4): 95TVN415. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/95TVN415>.
3. Li P., Zhang T., Wang C. Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Columns Subjected to Axial Compression. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018; 2018: 4059675. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4059675>.
4. Zhang X.-N., Shan R.-L., Qi C.-Z. Experimental and numerical application on bending resistance of concrete filled tube arch at fixed ends. *Romanian Journal of Materials*. 2018; 48(2): 251–259. Available at: <https://www.revista-romana-de-materiale.upb.ro/administrare/content/doc/2018/2/16/server/files/articol.pdf> (accessed 28th September 2023). (In Eng.).

5. Zhang X., Liang N., Lu X., Gu A., Shan J. Optimization Method for Solving the Reasonable Arch Axis of Long-Span CFST Arch Bridges. *Advances in Civil Engineering*. 2019; 2019: 7235656. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/7235656>.
6. Zheng J., Du H., Mu T., Liu J., Qin D., Mei G. et al. Innovations in Design, Construction, and Management of Pingnan Third Bridge — The Largest-Span Arch Bridge in the World. *Structural Engineering International*. 2021; 32(2): 134–141. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/10168664.2021.1956399>.
7. Chen B.-C., Chen Y.-J., Qin Z.-B., Hikosaka H. Application of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridges and Study on Ultimate Load-Carrying Capacity. In: P. Roca and E. Oñate (Eds). *Arch Bridges ARCH'04*. Barcelona: CIMNE; 2004. Available at: <https://caminstech.upc.edu/sites/default/files/Application%20of%20Concrete%20Filled%20Steel%20Tubular%20Arch%20Bridges%20and%20Study%20on%20Ultimate.%20Load-Carrying%20Capacity.pdf> (accessed 28th September 2023). (In Eng.).
8. Zhang W.-Z., Chen B.-C., Huang W.-J. Design of The Second Highway Bridge over Yellow River in Zhengzhou, China. In: P. Roca and E. Oñate (Eds). *Arch Bridges ARCH'04*. Barcelona: CIMNE; 2004. Available at: <https://caminstech.upc.edu/sites/default/files/Design%20of%20the%20Second%20Highway%20Bridge%20over%20Yellow%20River%20in%20Zhengzhou.%20China.pdf> (accessed 28th September 2023). (In Eng.).
9. Astankov K.Yu., Ovchinnikov I.G. [Prospects for the use of pipe-concrete structures for the construction of small arch bridges]. In: [Traditions, modern problems and prospects for the development of construction: Collection of scientific articles, Grodno, May 13–14, 2021]. Grodno: Yanka Kupala State University of Grodno; 2021. p. 110–112. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46577655> (accessed 28th September 2023). (In Russ.).
10. Wang S., Li Y., Liu Z., Cheng T. Calculation model of concrete-filled steel tube arch bridges based on the “arch effect”. *Frontiers in Materials*. 2023; 9: 1084999. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1084999>.
11. Drobysheskiy B.A. Malyye mosty: monografiya [Small Bridges: Monograph]. Moscow: INFRA-M; 2020. (In Russ.).
12. Moiseyev O.Yu., Paryshev D.N., Ovchinnikov I.G. et al. [Tube-concrete beams with a partially prestressed concrete core for the spans of small bridges]. [Modernizatsiya i nauchnyye issledovaniya v transportnom komplekse]. 2016; 1: 283–288. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27202374> (accessed 11th October 2023). (In Russ.).
13. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Moiseyev O.Yu. et al. [Increasing the efficiency of pipe-concrete beams for bridge spans using prestressing]. In: [Transport systems of Siberia. Development of the transport system as a catalyst for the growth of the state economy: International scientific and practical conference, Krasnoyarsk, April 07–08, 2016. Volume Part 1]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2016. p. 147–150. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26667546> (accessed 11th October 2023). (In Russ.).
14. Moiseev O.Y., Paryshev D.N., Ovchinnikov I.G., Kharin V.V., Ovchinnikov I.I. et al. Innovative tube concrete beam in span structures of minor beam bridges. *Innotrans*. 2016; (2): 67–71. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.20291/2311-164X-2016-2-67-71>.
15. Ovchinnikov I.G., Paryshev D.N., Il'tyakov A.V., Moiseyev O.Y. et al. Increasing The Load Capacity of a Concrete Beam. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2019; (4): 58–66. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15593/24111678/2019.04.07>.
16. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikxaldykin E.S. About the problem of the analysis of tube-confined concrete structures with a shell made of different materials. Part 2. Calculation of tube-confined concrete structures with a metallic shell. *Naukovedenie*. 2015; 7(4): 112TVN415. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/112TVN415>.
17. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikxaldykin E.S. About the problem of the analysis of tube-confined concrete structures with a shell made of different materials. Part 3. Experience of using fiber reinforcement plastic in bridge construction. *Naukovedenie*. 2015; 7(5): 27TVN515. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/27TVN515>.

18. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikxaldykin E.S. About the problem of the analysis of tube-confined concrete structures with a shell made of different materials. Part 4. The application of tube-confined concrete piles with fiber reinforcement plastic shell. *Naukovedenie*. 2015; 7(6): 148TVN615. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/148TVN615>.
19. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikxaldykin E.S. About the problem of the analysis of tube-confined concrete structures with a shell made of different materials. Part 5. The application of tube-confined concrete arch with fiber reinforcement plastic shell in bridge engineering. *Naukovedenie*. 2016; 8(1): 02TVN116. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/02TVN116>.
20. Chen Z., Pu S., Wang H. Numerical Analysis on the Bending Capacity of the Concrete-Filled Micro-Steel-Tube Piles. *Mathematical Problems in Engineering*. 2022; 2022: 2317594. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/2317594>.
21. Storozhenko L.I., Efimenko V. I., Plakhotnyy P.I. Izgibayemyye trubobetonnyye konstruktsii [Flexible pipe concrete structures]. Kyiv: Budivel'nik; 1994. (In Russ.).
22. Astankov K.Yu., Permikin A.S., Ovchinnikov I.G. Analysis of the Possibility of Applying Russian Standards for The Design of Steel-Pipe Concrete Structures in Small-Scale Bridge Engineering. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2022; (2): 53–63. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15593/24111678/2022.02.07>.

Information about the authors:

Konstantin Yu. Astankov — Ural State Transport University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: ast-most@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2592-5569>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=981058

Submitted: 8th December 2023. Revised: 10th March 2024. Published online: 24th March 2024.